

Van 형 차량의 보행자 충돌 사고 해석 모델

안승모*, 강대민#

Analytical Model in Pedestrian Accident by Van Type Vehicle

Seung-Mo Ahn*, Dae-Min Kang#

ABSTRACT

The fatalities of pedestrian accounted for about 40.0% of all fatalities in Korea (2005 year). In pedestrian involved accident, the most important data to inspect accident is throw distance of pedestrian. The throw distance of pedestrian can be influenced by many variables, such as vehicular frontal shape, vehicular impact speed, the offset of impact point, the height of pedestrian, and road condition. The trajectory of pedestrian after collision can be influenced by vehicular frontal shape classified into sedan type, box type, SUV type and van type. Many studies have been done about pedestrian accident with passenger car model and bus model for simple factors. But the study of pedestrian accident by van type vehicle was much insufficient, and even that the influence of multiple factors such as the offset of impact point was neglected. In this paper, a series of pedestrian kinetic simulation were conducted to inspect relationship between throw distance and multiple factors with using PC-CRASH s/w, a kinetic analysis program for a traffic accident for van type. By based on the simulation results, multi-variate regression was conducted, and regression equation was presented.

Key Words : Pedestrian(보행자), Restitution Coefficient(반발계수), Multi Variate Regressions(다중 회귀분석), Vehicle of Van Type(밴 형 차량)

1. 서 론

2005년 한 해 동안 국내에서 전체 교통사고 사망중 보행자 사고로 인한 사망자는 전체의 40.0%인 2,548 명으로 보행자 사고의 치명도가 타 사고에 비해 상당히 높고 보행자 사고로 인한 사회적 손실이 심각하고 [1] 보행자 사고로 인한 법적 분쟁이 갈수록 증가하는 것이 현실이다.

하지만 보행자 교통사고의 충돌 상황과 충돌 순간 차량 속도 분석에 대한 연구는 현재 기초적 물리 이론을 근거로 단순 인자만 고려하여 분석하는 방법에 의존하는 단계에 머물러있고, 다물체 관철 구조인 보행자의 충돌 후 거동은 차량의 전면 형상에 영향을 받으며 현재 다양한 전면 형상의 차량이 시판되고 있으나 승용차 모델에만 한정적으로 수행되었다. 현재 까지 보행자 사고에 있어 충돌 순간 차량 속도 분석에 관하여 보행자 사고가 강성체인 차량과 연성체인 인체간의 충돌 상황이고 충돌 실험의 윤리적 문제로 인해 충돌 대상물의 포괄적인 변형 정도와 상관되는 수치 분석 방법은 제시된 바 없으며 충돌 대상물의

* 도로교통안전공단

교신저자, 부경대학교 기계공학부

E-mail; dmkang@pknu.ac.kr

위치 자료를 근거로 한 분석 방법만이 보행자 사고 분석에 관한 유일한 포괄적 분석 방법이다. 충돌 대상물의 위치 자료 중에서 차량 파편물의 낙하지점과 보행자의 최종 전도 지점간의 거리를 토대로 분석되는 보행자의 전도 거리는 충돌 순간 차량 대 보행자간의 반발 상태와 운동학적 및 운동역학적인 상호 관계에 의해 결정되므로[2] 보행자 사고의 속도 분석에 있어 객관적인 자료로 취급할 수 있는 충돌 대상물의 핵심적인 위치 자료이다. 다물체 관절 구조인 보행자 인체 충돌 후 거동에 관하여 최초 충격 지점은 차량의 전면 범퍼의 높이에 영향을 받고 충돌 후 보행자 인체의 선회 이동에 의한 2차 충돌은 후드 패널의 높이 및 길이에 영향을 나타내므로, 충돌 후 차량과 보행자 간의 충격력의 상호 전달에 의한 결과인 보행자의 충돌 후 전도 거리는 차량의 전면 형상에 영향을 받는다[3]. 현재 시판중인 차종을 전면 구조 형상에 따라 본네트 형상의 승용 차량은 세단 형, 승용차 보다는 차체가 크고 전면 형상이 본네트 형상보다 높아 충돌 후 보행자를 완전히 감싸는 충돌 유형으로 구분되기 어려운 차량은 SUV 형, 충돌 후 보행자를 감싸는 선회 운동 없이 보행자 신체 상부를 충격하는 버스 및 대형 트럭과 같은 박스 형, 전면 구조 형상이 SUV와 박스 형의 중간 형상인 소형 트럭인 밴 형으로 구분할 수 있으나 밴 형 차량의 보행자 충돌사고 시 사고해석에 관한 연구가 매우 불충분하다.

본 연구에서는 밴 형 차량에 의한 보행자 충돌 사고에서 차량의 충돌속도, 충돌 윗셋량, 보행자 신장 및 노면상태등 보행자의 전도 거리에 영향을 미치는 다중 변수인자를 복합적으로 고려하여 밴 형 차량의 보행자 충돌사고 해석모델에 관해 연구하였다.

2. 보행자 운동 이론 및 해석 조건

2.1 보행자 충돌해석 방법

보행자의 운동 거동 및 보행자의 충격 시 인체의 안전도를 분석하기 위한 역학적 방법으로 보행자 신체 및 보행자 더미를 이용한 풀 스케일 테스트(Full scale Test), 보행자 신체의 일부분을 개발하여 충돌 실험을 수행하는 컴포넌트 테스트(Component Test),

컴퓨터 시뮬레이션 테스트가 있다[4]. 보행자 신체 일부분만 충돌하는 컴포넌트 테스트는 다물체 관절 구조인 보행자의 운동 역학적 거동을 분석하기는 부적합하다. 보행자 더미를 이용한 풀 스케일 테스트에 관하여 보행자의 전도 거리 특성에 관한 연구는 다양한 신장을 가진 보행자 모델에 대한 포괄적이고 단계적인 실험이 실행되어야 하므로 다양한 스케일의 보행자 더미가 구비되어야 하고 또한 많은 종류의 충돌 대상 차량과 충돌 횟수가 필요하다. 그리고 보행자 더미를 이용한 보행자 전도 거리에 관한 연구는 보행자 더미의 강성도에 따른 반발 특성이 얼마나 실제 보행자와 일치하는지 여부가 충돌 후 보행자의 전도 거리 특성에 관한 연구에 관한 핵심이며 제작된 보행자 더미의 재질과 조인트 부의 회전 특성이 실제 인체의 연성 특성과 일치해야 한다. 그러므로, 보행자 더미와 차량을 이용한 풀 스케일 테스트는 충돌 실험 장비에 의한 경제적인 제약, 충돌 실험 조건의 제약, 충돌 횟수에 따른 경제적 비용 등 많은 제약 요소로 인해 실행되기 어렵다[5]. 이에 반해 컴퓨터 시뮬레이션 테스트는 자동차와 보행자를 3차원으로 모델링하여 다양한 충돌 변수를 고려하여 모의 시뮬레이션을 수행할 수 있고, 실제 보행자를 대상으로 한 실험 및 풀 스케일 테스트, 컴포넌트 테스트에서 해석이 곤란한 여러 상황적 조건을 가변적으로 분석할 수 있다.

PC-CRASH 자동차 충돌 해석 전용 시뮬레이션 프로그램은 동역학 관련 상용 프로그램에 비해 실제 사고 도로 환경과 유사하게 도로의 경사, 노면 건조, 습윤 정도 등 가상의 도로 환경 구현이 가능하고 보행자 모델의 크기 및 중량 등 스케일을 임의적으로 변경 가능하며, 차량을 보행자 충돌로 인해 손상 변형이 없는 강체 모델을 전제로 다양한 차량 모델이 제시되어져 있다[6]. 보행자의 전도 거리는 차량의 전면 형상에 영향을 받으므로 차량의 전면 형상 모델링의 실제 차량과의 근사도가 충돌 해석 결과에 영향을 미치며, PC-CRASH 자동차 충돌 해석 전용 시뮬레이션 프로그램은 차량 모델링에 있어 3D-DXF 모델 적용이 가능하여 실제 차량의 외형 형상과 거의 유사한 모델로 차량을 모델링 가능하여 본 연구에서는 PC-CRASH 자동차 충돌 해석 전용 시뮬레이션 프로그램으로 보행자의 거동 상태를 분석 연구하였다.

2.2 반발계수계산

본 연구에서 차량의 운동과 인체를 구성하는 타원 관절체의 다물체 운동을 PC-CRASH 자동차 충돌 해석 전용 프로그램으로 해석하였고, PC-CRASH의 충돌 모델은 충돌 후 차량 모델과 인체를 구성하는 타원체가 변형되지 않고 에너지 전달만 가능하다고 전제하는 강체 역학의 범주 내에서 역적-운동량 이론을 이용하는 강체 해석 방법인 쿨드리호슬리바 충돌 모델을 적용하고 있다. 충돌 후 보행자가 전달 받는 운동에너지의 총량은 반발 계수에 의해 결정되는 반발 충격에 기인하며, 압축 충격과 반발 충격의 비인 로 정의된다. 보행자의 전도 거리 해석에 관하여 반발 계수는 전달 받는 충격에너지의 총량과 상관되며 해석의 주요 인자로 작용한다[7].

차 대 차 충돌에서 반발계수는 충돌 속도에 따라 감소하는 비례관계를 가지며, 반발계수는 충격력의 작용 방향, 충돌 매체의 강도와 충격에너지 흡수의 개별 특성에 따라 다르나[8], 쿨드리호슬리바 충돌 모델에서 식(1)과 근사한 값을 가진다고 제시하고 있다.

$$K = e^{-0.5862V + 0.07309V^2 - 0.00348V^3} \quad (1)$$

쿨드리호슬리바 충돌 모델에서 제시한 반발계수 값은 충돌하는 두 물체의 강성도가 대등한 물체간의 충돌에서 적용될 수는 있으나, 강체로 취급되기엔 너무 연성체인 인체와 강성체인 차량과 충돌에서 제시한 반발계수 값과 동일한 반발계수를 적용한다는 것은 신뢰성 있는 결과를 예측하기 어렵다. 보행자 인체의 반발 계수에 관하여 실제 충돌에 의한 계측 값이 필요하나, 실제 보행자를 차량에 충격시켜 반발 정도를 계측하는 실험은 윤리 문제 상 실행될 수 없어 반발계수계산은 실제 발생한 보행자 사고 중에서 보행자의 전도 거리에 상관하는 인자들을 파악 가능한 선별된 사고 자료를 근거로 PC-CRASH 프로그램으로 보행자 전도 거리에 상관하는 인자를 고려한 시뮬레이션을 실행하여 실제 사고 결과와 동일한 결과 값을 도출하는 반발계수를 산출하였다.

PC-CRASH 시뮬레이션 프로그램으로 몇몇의 보행자 사고 사례를 보행자 전도 거리에 상관하는 인자를 고려한 시뮬레이션을 실행하여 사고 차량이 실제 사고 현장에 표기된 지점에 정지 가능하고 보행자가 추정 충돌 지점에서 충돌하여 최종 전도 지점에 전도

가능한 반발계수를 반복적인 충돌 실험을 통해 도출한 바, 보행자의 반발 계수는 보행자 인체가 차량 강성에 비해 매우 약한 연성체이므로 사고 차량의 형태별 특성 및 충돌 속도에 영향을 거의 받지 않고 인체의 고유 특성에 의해 0.1로 수렴됨을 나타내었다.

3. 해석 결과

다중 관절체로 구성된 보행자 인체 모델의 충돌 후 거동을 결정하는 인자에 관해 차량 관련 인자, 보행자 관련 인자, 노면 관련 인자로 구분할 수 있다. 보행자의 충돌 후 보행자 거동의 결과인 보행자에 전도 거리에 영향을 줄 것으로 추정되는 인자를 선별하여 밴 형 차량의 보행자 충돌사고시 보행자 전도거리 예측을 위한 통계적 회귀분석을 위하여 다음과 같은 시뮬레이션을 행하였다.

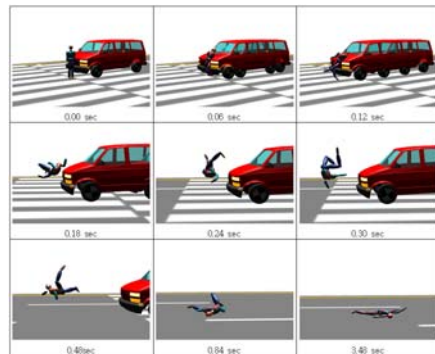


Fig. 1 Trajectory simulation of pedestrian(Van)

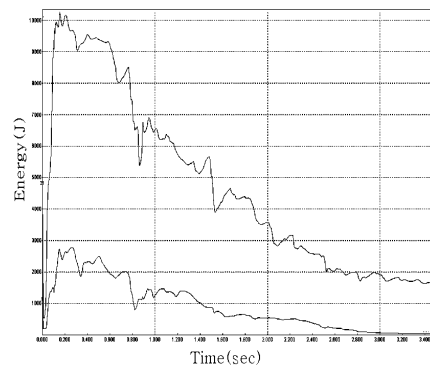


Fig. 2 Diagram of pedestrian's energy variation

Fig. 1는 벤 형 차량의 표준 차량 모델로 선정된 아스트로 벤의 3-DXF 모델이 건조 노면에서 보행자의 신장이 1.65m인 1.65m 보행자 모델을 0% 옵셋 상태에서 45 km/h의 충격 속도로 충돌시 보행자 거동 과정을 시간에 따라 단계적으로 보행자 거동 특성을 고찰하기 위해 시뮬레이션 해석한 결과이다. 이 결과에서 0.0 sec에서 충돌이 시작되어 0.06 sec에 보행자 인체 구성 다물체의 토르소 관절체가 후드 패널에 충돌하는 2차 충돌 현상이 발생되었으며, 0.84 sec 순간에 보행자 모델이 노면에 착지를 시작하여 노면에 미끄러져 이동하다 3.84sec에서 최종 전도된 상태를 나타내었다.

Fig. 2는 보행자 거동 해석 시뮬레이션에서 충격 에너지의 전달 및 감쇠 과정을 나타낸다. 결과에서 그래프 상의 상단 곡선은 보행자 구성 다물체의 전체 에너지 감쇠를 나타내고, 하단 곡선은 보행자 인체 구성 다물체의 중심 파트인 토르소 관절체의 에너지 감쇠를 나타낸다.

Fig. 2에서 전체에너지는 약 0.12sec까지 급격한 증가를 나타내며, 이것은 Fig. 2의 이탈 직전 순간이다. 보행자 인체 구성 다물체에 전달되는 에너지는 2차 충돌 후 이탈 직전 과정까지 전달되고, 2차 충돌 이후이고 이탈 직전 순간인 0.12sec 경에 보행자 인체 구성 다물체의 하체부가 회전 모멘트에 의해 선회되어 보행자 모델의 하중 지지에 의한 접촉 저항이 완화된다. 이후 전방으로 튕겨져 날아가는 이탈 과정에서 타원 관절체 간의 회전마찰에 의해 에너지는 부분적인 감쇠를 나타낸다. 벤 형은 박스 형과 SUV 형의 혼합 유형으로 SUV 형처럼 충돌 후 보행자 신체가 완전히 차체 전면부에 감싸지지 않고, 박스 형처럼 전면부 형상이 높은 유형으로 최초 충돌과 2차 충돌 사이에 보행자의 거동이 다른 유형에 비해 작은 상태이다. 최초 충돌 후 토르소 관절체에 즉각적인 에너지 전달은 발생하지 않은 상태이고 Fig. 2에서 인체 구성 다물체의 에너지 전달은 충돌과 동시에 급격한 증가가 발생하는데 비해 토르소 관절체의 에너지 전달은 세던 형과 유사하게 약 0.03sec 지연된 발생 상태를 나타낸다. 충돌 후 0.06sec 순간에 2차 충돌이 시작되어 0.14 sec 순간까지 2차 충돌이 지속되고, 0.14sec에 인체 구성에서 가장 큰 질량 특성을 가진

토르소 관절체의 2차 충돌이 연속되어 인체 구성 다물체의 전체 에너지 전달이 최대가 되었다. 보행자 인체 구성 다물체의 전체 전달 에너지 최대값 발생 순간과 토르소 관절체의 전달 에너지 최대값 발생 순간이 0.14sec로 거의 동시에 발생하여 최대값 발생 순간이 이탈 순간과 일치한다. 벤 형에서는 보행자 인체 상부를 충격하고, 보행자 인체가 완전히 차체 전면부를 감싸는 형상보다 보행자 하체부의 선회에 의한 하중 지지에 의한 접촉 저항이 완화가 비교적 작게 발생하였다. 이로 인해 보행자 인체 구성 다물체의 전체 에너지 전달이 최대값 발생 순간과 토르소 관절체의 에너지 전달 최대 값 발생 순간이 거의 일치한 것으로 나타났으며, 2차 충돌 종료 순간인 이탈 순간(0.14sec) 직전까지 에너지를 전달 받아 최대값 발생 순간은 이탈 순간에 발생하였다. 또한 이탈 이후 충돌 후 튕겨져 날아가는 비상 시간이 0.14sec에서 0.84sec로 약 0.70sec 동안의 비상 시간으로 비교적 길게 나타났고 보행자의 전도 거리는 시간 변화에 따른 변곡없이 완만한 선행의 증가상태로 약 29m로 가장 긴 상태로 도출되었다.

Fig. 3~Fig. 6등은 벤 형 차량의 표준 모델로 선정된 시보레의 아스트로 벤 차량에 대해 1.20m~1.83m의 신장을 가지는 보행자 모델과의 충돌로 인해 발생하는 보행자의 전도 거리에 영향을 주는 인자인 노면 상태, 충돌 속도 및 옵셋에 따른 전도 거리의 영향을 각각 나타내고 있다. 여기서 Fig. 3은 보행자 신장이 1.83m인 1.83모델, Fig. 4는 1.65m 모델, Fig. 5는 1.40m 모델, Fig. 6은 1.20m 모델에 대해 건조 상태 및 습윤 상태에서 충돌속도 및 옵셋에 따른 전도 거리의 변화를 각각 나타내고 있고 옵셋량은 차량의 중심선으로부터 0%, 40%, 80%로 설정하였다. 또한 보행자 인체의 차량표면에 대한 마찰계수와 노면에 대한 마찰계수는 드래그 게이지(Drag gauge)를 이용하여 보행자 신체에 연결하여 보행자 체중과 드래그 게이지에서 측정된 값을 쿨롱의 마찰법칙에 적용하여 구하였다. 그 결과 비가 내린 상태에서 보행자 대 노면 마찰계수는 0.6, 보행자 대 차량표면의 마찰계수는 0.3으로 나타났으며, 비가 내리지 않은 상태에서 보행자 대 노면 마찰계수는 0.65, 보행자 대 차량표면의 마찰계수는 0.4로 나타났다.

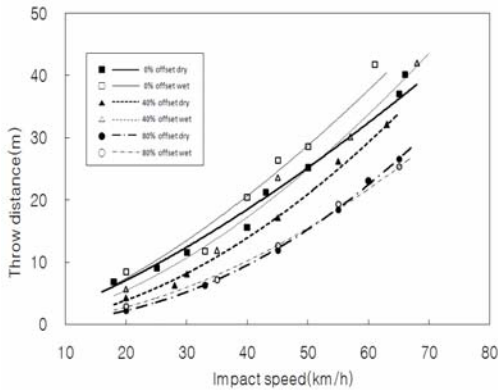


Fig. 3 Results of simulation (1.83m height model)

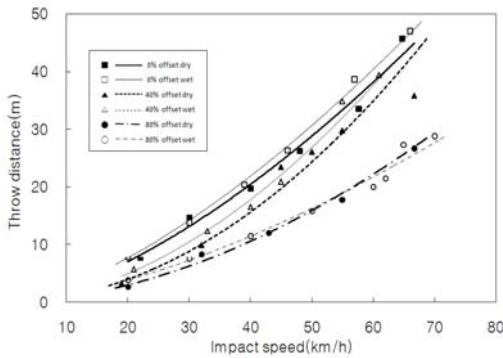


Fig. 4 Results of simulation (1.65m height model)

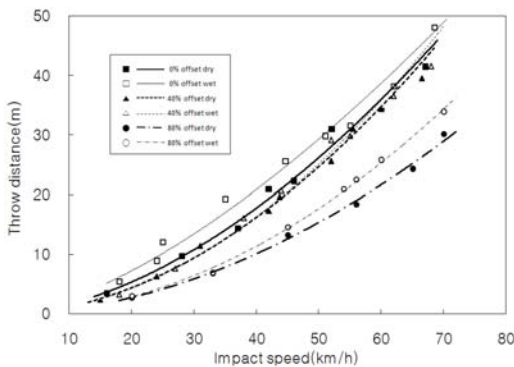


Fig. 5 Results of simulation (1.40m height model)

이러한 마찰계수를 고려하여 시뮬레이션한 결과 보행자의 신체 크기에 관계없이 충돌시 움셋량이 적을수록 동일한 충돌속도에 의한 보행자의 전도거리

는 증가하였고, 노면상태가 습윤 상태가 건조 상태보가 다소 전도거리가 증가한 것은 보행자의 마찰계수가 비가 내린 노면과 건조 노면을 비교하면 비가 내린 노면이 마찰계수가 낮으므로 결과적으로 보행자의 전도거리는 증가한다고 볼 수 있다.

다중인자를 고려한 밴 형 차량의 보행자 사고해석 모델을 구하기 위하여 회귀분석법을 이용하였다. 회귀분석법은 한 변수(종속변수)가 다른 여러변수(독립변수)에 의해 어떻게 영향을 받는가를 분석하는 것으로 이를 위해 SPSS 프로그램을 이용하여 보행자의 전도 거리에 영향을 미치는 다중 변수 인자를 단계적으로 변화시켜 해석하였다. 이러한 시뮬레이션 결과를 근거로 밴 유형 차량이 보행자를 충돌 시 다중 변수 인자를 고려한 보행자 전도 거리의 회귀 모델 식은 식(2)와 같다.

$$d_i (Van) = 13.57 - 0.0018P_o^2 + 0.0086v^2 - 4.81h + 1.03w \quad (2)$$

이 식에서 d_i 는 보행자의 전도거리, P_0 항은 차량 전면부의 충격지점 움셋을 의미한 것으로 차체 전면폭의 1/2를 100%으로 한다. v 항은 충돌시 차량의 속도(km/h)이고 h 항은 보행자의 키(m), w 는 도로의 노면상태, 즉 젖은 상태는 1, 젖지 않는 상태는 0으로 구분하였다. 회귀 모델식에서 모델의 적합성을 보여주는 Adj R2 값은 0.9182로 나타나 주어진 모델이 추정에 적합하다고 생각된다. 결과 식에서 충격지점 움셋이 40%에서 80%로 증가에 따른 보행자의 전도거리는 -2.88m에서 -11.52m로 감소함을 나타내고 차량의 속도는 제곱에 정(+)의 효과로서, 인체의 키는 음(-)의 효과를 지닌다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 실제 사고 분석을 통해 도출되는 보행자의 충돌 반발계수와 차량 충돌속도, 보행자 신장, 충돌 움셋량 및 노면 상태등 보행자의 전도 거리에 영향을 미치는 여러 인자를 분석한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 밴 형 차량의 보행자 충돌 시 다중 회귀 분석 모델의 적합성을 보여주는 Adj R2 값은 0.9182로 나타났다. 주어진 모델이 보행자 사고예측에 적합하다고 생각된다.

2. 밴 형 차량은 최초 충돌과 2차 충돌 현상이 거의 동시에 발생하며 2차 충돌에 의한 감쇄가 비교적 적게 나타난 상태이고, 보행자 하체부의 선회 시 하중 지지 부분의 접촉 저항이 완화가 비교적 작게 발생하여 전체적으로 전도 거리가 길게 발생하는 것으로 해석되었다.

3. 회귀분석법으로 구한 밴형 차량의 보행자 충돌 사고시 보행자의 전도거리에 대한 충돌 읍셋의 량, 충돌속도, 신체 신장 및 노면상태의 영향에 대한 관계는 아래식과 같고 여기서 읍셋량이 적을수록, 충돌속도는 클수록, 보행자의 신체크기는 적을수록, 그리고 노면상태가 건조 상태보다 습윤 상태일수록 보행자의 전도거리가 증가하였다.

$$d_t(Van) = 13.57 - 0.0018P_o^2 + 0.0086v^2 - 4.81h + 1.03w \quad (2)$$

참고문헌

1. 교통사고 분석센터, “교통사고 통계분석”, 도로교통안전관리공단 pp. 44, 2006.
2. J. Standard Baker, Lynn B. Fricke, "The traffic Accident Investigation Manual", Northwestern Traffic Institute, Chaper 17, pp. 13-30, 1986.
3. 강대민, 안승모, “차 대 보행자 사고에서 보행자 전도 거리에 영향을 주는 인자에 관한 연구”, 2007년 한국자동차공학회 춘계학술대회논문집, pp. 1540-1545, 2007.
4. 日本 自動車 技術會, “自動車 工學 技術 大辭典”, 科學技術, 基礎理論編, pp. 349, 1996.
5. 유장석, 박경진, 장면순, “차량형상과 충돌형태에 다른 보행자 거동특성에 관한 연구”, 한국자동차공학회 논문집, 제13권 제4호, pp. 8-18, 2005.
6. Moser, H. Steffan, G. Ksanicky, "The Pedestrian Model in PC-CRASH- The Introduction of a Multi Body System and its Validation" SAE International, 1999-01-0445.
7. 江守 一郎, “自動車 事故工學”, 技術書院, pp. 98-101, 1993.
8. Randall K. Noon, “Engineering of analysis of vehicular accidents”, CRC Press Inc, pp. 123-136, 1994.